



EFFECT OF CONTACT PRESSURE ON THE RESISTANCE CONTACT VALUE AND TEMPERATURE CHANGES IN COPPER BUSBAR CONNECTION

PENGARUH TEKANAN KONTAK TERHADAP NILAI TAHANAN KONTAK DAN PERUBAHAN TEMPERATUR PADA SAMBUNGAN BUSBAR TEMBAGA

Agus Risdiyanto ^{a,b}, Noviadi Arief Rachman ^{b,*}, Maulana Arifin ^b

^a Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia

^b Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronika - LIPI
Komp. LIPI Bandung, Jl. Sangkuriang No.21/154D, Bandung 40135, Indonesia

Received 11 Oct 2012; Received in revised form 19 November 2012; Accepted 19 November 2012
Published online 18 December 2012

Abstract

This paper discussed the influence of tightness or contacts pressure on copper busbar joints to determine changes in the value of the initial contact resistance and the maximum temperature at the joint due to high current load. The test sample was copper busbar 3 x 30 mm with configuration of bolted overlapping joint. Increasing contact pressure at the joint was measured to find out its effect on the value of contact resistance. The applied pressure was 6 to 36 MPa. Procedure of contact resistance measurement refer to the ASTM B539 standard using four-wire method. The sample subsequently loaded with the current of 350 A for 60 minutes and the maximum temperature at the joint was measured. The result showed that increasing contact pressure at the busbar joint will reduce the contact resistance and maximum temperature. The increase of contact pressure from 6 to 30 MPa causes decreasing contact resistance from 16 $\mu\Omega$ to 11 $\mu\Omega$. Further increasing of contact pressure more than 30 MPa did not affect the contact resistance significantly. The lowest temperatur of busbar joint of 54°C was reached at a contact pressure of 36 Mpa.

Key words: contact pressure, contact resistance, maximum temperature, copper busbar joint.

Abstrak

Paper ini membahas pengaruh kekencangan atau tekanan kontak pada sambungan busbar tembaga untuk mengetahui perubahan nilai tahanan kontak awal dan temperatur maksimum pada sambungan akibat pembebanan arus yang tinggi. Sampel uji menggunakan busbar tembaga ukuran 3 x 30 mm untuk konfigurasi sambungan tumpang tindih dengan baut tunggal. Peningkatan tekanan kontak pada sambungan diukur untuk mengetahui pengaruhnya terhadap nilai tahanan kontak. Besarnya tekanan kontak yang diterapkan adalah 6 sampai 36 MPa. Prosedur pengukuran tahanan kontak mengacu pada standar ASTM B539 menggunakan metode empat kawat. Selanjutnya sampel dibebani dengan arus 350 A selama 60 menit kemudian diukur temperatur maksimum pada masing-masing tekanan kontak. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai tahanan kontak pada sambungan busbar akan semakin kecil dengan meningkatnya tekanan kontak. Peningkatan tekanan kontak dari 6 sampai 30 MPa menurunkan nilai tekanan kontak dari 16 micro ohm sampai 11 micro ohm. Peningkatan tekanan kontak pada tekanan lebih dari 30 MPa tidak menyebabkan kenaikan tahanan kontak secara signifikan. Temperatur terendah sambungan busbar adalah 54°C dan dicapai pada tekanan kontak 36 MPa.

Kata kunci: tekanan kontak, tahanan kontak, temperatur maksimum, sambungan busbar tembaga.

I. PENDAHULUAN

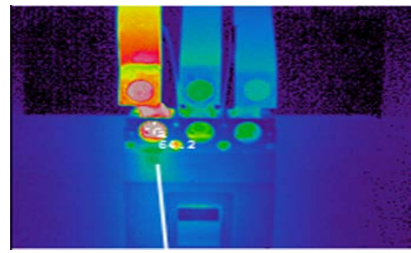
Sistem pembangkit tenaga listrik memerlukan optimasi dalam penyaluran energi listrik mulai dari pembangkitan, transmisi, distribusi sampai

ke peralatan listrik konsumen. Semua peralatan yang didesain tidak hanya mampu memenuhi fungsinya, namun harus memiliki ketahanan terhadap berbagai kondisi operasi diluar normal baik dari segi kelistrikan, mekanik, faktor lingkungan, serta pertimbangan ekonomis [1]. Salah satunya adalah sistem sambungan

* Corresponding Author. Tel: +62-22-2503055
E-mail: opay_23@yahoo.com



(a)



(b)

Gambar 1. Pemanasan sambungan busbar dengan circuit breaker akibat kontak yang buruk, (a) foto visual, (b) foto infra merah.

penghantar yang menjadi komponen paling penting peranannya dalam efisiensi penyaluran energi listrik.

Sambungan yang stabil dan memiliki tahanan kontak yang kecil akan mengurangi biaya pemeliharaan serta mengurangi *down time* keseluruhan peralatan sehingga resiko kegagalan dapat ditekan [2]. Semakin besar tahanan kontak pada sambungan dan jika dialiri arus yang cukup besar, maka semakin besar pula jatuh tegangan (V_d) dan rugi-rugi daya (I^2R) yang terjadi. Nilai rugi-rugi daya yang terjadi pada setiap sambungan ini jika dijumlahkan bisa sangat signifikan besarnya mengingat dalam suatu sistem tenaga listrik terdapat ratusan hingga ribuan sambungan. Jadi dalam suatu saluran yang mengalirkan arus listrik, rugi-rugi daya saluran tidak hanya ditentukan oleh tahanan saluran saja, namun ditentukan juga oleh besarnya tahanan kontak pada setiap sambungan dan besarnya arus yang mengalir pada saluran tersebut [3].

Kegagalan kontak listrik pada sambungan biasanya terjadi karena instalasi awal yang tidak baik, atau karena terjadi pengendoran pada kontak selama waktu operasi serta pengaruh kondisi lingkungan yang tidak sesuai. Hal ini dapat mengakibatkan temperatur pada sambungan semakin meningkat dan kondisi ini dapat merusak peralatan lain disekitarnya bahkan dapat menimbulkan kebakaran. Gambar 1 menunjukkan salah satu contoh bentuk pemanasan yang berlebih pada sambungan busbar salah satu *phasa* dengan *circuit breaker*

akibat dari kinerja kontak yang buruk.

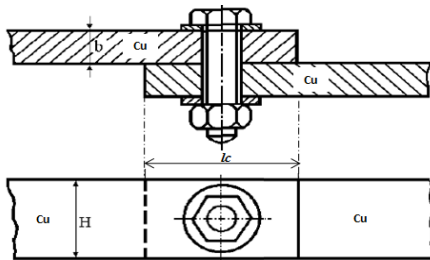
Selanjutnya paper ini membahas pengaruh besarnya kekencangan atau tekanan kontak pada sambungan busbar tembaga terhadap perubahan nilai tahanan kontak yang juga berdampak pada perubahan temperatur pada sambungan.

II. DASAR TEORI

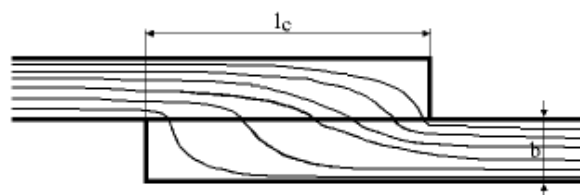
Sambungan penghantar busbar (*busbar joint*) merupakan pertemuan antara penghantar yang bertegangan dengan penghantar tidak bertegangan dengan maksud untuk menyalurkan arus atau energi listrik dari sumber ke peralatan listrik lainnya. Adanya sambungan disebabkan karena keterbatasan panjang penghantar yang ada tidak memenuhi jarak antara sumber listrik ke beban. Selain itu, sistem sambungan diperlukan karena adanya sumber yang melayani beberapa beban secara paralel.

Dalam pemasangannya, sambungan busbar dengan baut secara mekanik memiliki tekanan yang kuat, stabil, tahan getaran karena akan mempengaruhi nilai tahanan kontak sambungan. Contoh jenis sambungan busbar tembaga dengan baut dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 2, dimana Cu: tembaga, b: tebal tembaga, H: lebar tembaga, dan l_c : daerah pertemuan kontak.

Gambar 3 menunjukkan daerah pertemuan kontak antar sambungan busbar yang memiliki distribusi kerapatan arus yang tidak seragam. Distribusi arus yang tidak seragam ini dapat menyebabkan daerah sambungan memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan temperatur diluar sambungan [4].



Gambar 2. Sistem sambungan busbar dengan baut tunggal (*bolted busbar joint*).



Gambar 3. Distribusi kerapatan arus pada sambungan busbar.

A. Kekuatan Mekanik Sambungan

Suatu kontak listrik yang dirancang dengan baik harus memiliki kekuatan mekanik yang cukup untuk menjaga integritas mekanik dalam kondisi beban normal maupun beban lebih. Kontak harus memiliki tekanan yang cukup untuk mempertahankan bidang kontak, sehingga memungkinkan bagian yang tidak terputus saat dilewati arus. Semakin besar gaya tekan kontak maka tahanan kontak akan semakin kecil. Namun tekanan ini tidak boleh melebihi batas elastis dari material lapisan kontak karena deformasi plastis dapat meningkatkan tekanan relaksasi yang akan menyebar ke seluruh bagian kontak dan dapat menyebabkan hilangnya kontak. Hubungan antara nilai tahanan kontak (R_c) dengan gaya tekan kontak dapat ditunjukkan dengan persamaan (1) [1]:

$$R_c = \frac{C}{F^n} \quad (1)$$

dimana,

- R_c : tahanan kontak (Ω)
- C : konstanta
- F : gaya tekan (Newton)
- n : eksponen

Nilai C dan n ditentukan berdasarkan konfigurasi jenis sambungan, tipe pelapisan sambungan dan material pelapis sambungan.

Semakin besar gaya tekan kontak maka tahanan kontak akan semakin kecil. Namun

tekanan ini tidak boleh melebihi batas elastis dari material lapisan kontak karena deformasi plastis dapat meningkatkan tekanan relaksasi yang akan menyebar ke seluruh bagian kontak. Jika batas elastis busbar terlampaui maka tekanan kontak pada sambungan akan menurun dan tahanan kontak dapat meningkat kembali. Hal ini disebabkan karena perbedaan koefisien ekspansi antara busbar tembaga dengan baut *stainless steel* [5].

Sambungan busbar dengan baut memiliki beberapa konfigurasi ukuran busbar dan jumlah baut. Jumlah dan ukuran baut biasanya bervariasi dari M6 sampai M20 sesuai dengan area sambungan. Torsi yang dipilih untuk masing-masing ukuran baut tergantung pada material baut dan suhu operasi maksimum yang diijinkan.

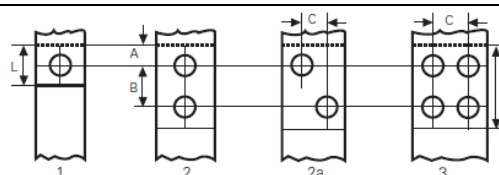
Tabel 1 dan Tabel 2 masing-masing menunjukkan ukuran dan jumlah baut yang digunakan pada beberapa jenis konfigurasi sambungan busbar dan besarnya torsi yang diijinkan berdasarkan ukuran baut sambungan menurut standar DIN 43673. Tahanan Kontak

Tahanan kontak (*contact resistance*) merupakan kriteria utama yang menentukan kehandalan kontak listrik suatu sambungan [6]. Nilai tahanan kontak suatu sambungan harus sekecil mungkin karena berhubungan dengan rugi-rugi daya dan peningkatan temperatur. Biasanya tahanan kontak suatu sambungan atau konektor yang mengalirkan arus listrik diukur dalam orde mikro ohm ($\mu\Omega$).

Tabel 1.

Ukuran dan jumlah baut yang digunakan pada beberapa tipe sambungan busbar.

Bar width (mm)	Shape 1		Shape 2 & 2a				Shape 3				Bolt size	Hole diameter
	L	A	L	A	B	C	L	A	B	C		
12	12	6									M5	5,5
15	15	7,5									M6	6,5
20	20	10									M8	9
25	25	12,5	55	12,5	30						M10	11
30	30	15	60	15	30						M10	11
40	40	20	80	20	40						M12	13,5
50	50	25	80	20	40						M12	13,5
60			80	20	40						M12	13,5
60			60	17	26	26					M12	13,5
80							80	20	40	40	M12	13,5
100							80	20	40	50	M12	13,5
120							80	20	40	60	M12	13,5



Tabel 2.

Kekuatan torsi yang diijinkan berdasarkan ukuran baut yang digunakan pada tipe sambungan.

Bolt size	Hole diameter	Torque (Nm)	
		Indoor	Outdoor
M5	5,5	2,5	3
M6	6,5	4,5	5,5
M8	9	10	15
M10	11	20	30
M12	13,5	40	60

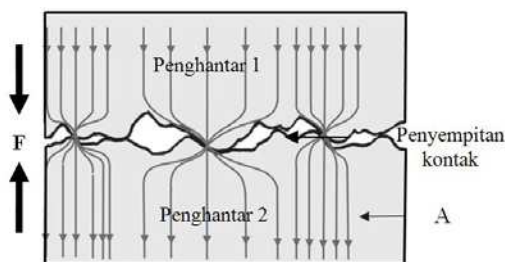
Nilai tahanan kontak dapat meningkat terhadap fungsi waktu tergantung pada area kontak, permukaan, material, tekanan kontak serta kondisi lingkungan seperti kelembaban, kontaminan dan lain-lain. Kontak listrik yang buruk terjadi jika hanya sebagian dari seluruh permukaan kontak saling bertemu, dengan kata lain permukaan lapisan kontak tidak rata karena mengalami penyempitan. Dengan adanya penyempitan permukaan kontak ini maka distribusi kerapatan arus menjadi semakin besar dan daerah inilah yang menjadi sumber panas dari suatu sambungan (*hot spot*). Penyempitan permukaan kontak tersebut dapat diilustrasikan seperti Gambar 4.

Tahanan yang timbul di daerah penyempitan permukaan kontak sambungan disebut juga tahanan penyempitan (*constriction resistance*) yang nilainya tergantung pada karakteristik material permukaan seperti tingkat kekerasan (*hardness*) dan resistivitasnya. Selanjutnya tahanan penyempitan kontak (*spot*) antara dua material penghantar yang sama dapat dituliskan dengan persamaan (2) [7]:

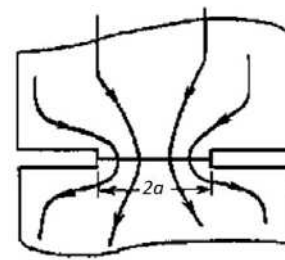
$$R_c = \frac{\rho}{2a} \quad (2)$$

dimana:

- R_c : tahanan kontak (Ω)
- ρ : resistivitas dua penghantar yang saling kontak (Ωm)
- a : luas area kontak (m^2)



(a)



(b)

Gambar 4. (a) Gambar permukaan kontak yang mengalami penyempitan (*hot spot*); (b) Gambar penyempitan kontak.

Masalah utama dalam penggunaan kontak sambungan paduan tembaga adalah mudah bereaksi pada lingkungan atmosfer. Lapisan oksida ini terbentuk karena terjadinya reaksi kimia antara unsur kimia logam dengan oksigen. Lapisan oksida (*oxide film*) atau kontaminasi pada permukaan kontak akan meningkatkan tahanan listrik yang dapat menyebabkan kegagalan dalam aplikasi kontak [8]. Lapisan oksida maupun lapisan material konduktif yang ada pada permukaan kontak sambungan tersebut selanjutnya dikenal dengan istilah *thin film*. Sehingga tahanan total dari suatu sambungan merupakan penjumlahan dari tahanan penyempitan dan tahanan *thin film*, dan dapat dituliskan dengan persamaan (3) dan (4) [7]:

$$R_j = R_c + R_f \quad (3)$$

dan

$$R_c = \frac{\rho}{2a} R_f = \frac{\sigma}{\pi a^2} \quad (4)$$

dimana,

- R_j : tahanan total sambungan (*joint resistance*) (Ω)
- R_c : tahanan kontak (Ω)
- R_f : tahanan lapisan film (Ω)
- σ : tahanan per area luas lapisan film (Ω/m^2)

B. Efek Pemanasan Pada Sambungan

Koefisien temperatur (α) dari suatu bahan menunjukkan perubahan tahanan untuk tahanan sebesar 1Ω pada pemanasan 1 K . Tahanan pada beberapa bahan penghantar (terutama pada bahan logam murni) akan bertambah dengan kenaikan temperatur sesuai dengan persamaan (5) [3]:

$$R_t = R_0[1 + \alpha_0(t - t_0)] \quad (5)$$

dimana:

- R_t : tahanan penghantar temperatur t (Ω)
- R_0 : tahanan penghantar pada temperatur awal/ambien (Ω)
- α_0 : koefisien temperatur awal (K^{-1})
- t : temperatur akhir ($^\circ\text{C}$)
- t_0 : temperatur awal/ambien ($^\circ\text{C}$)

Kontak listrik yang dilewati arus yang tinggi dapat menimbulkan disipasi daya di sepanjang bagian kontak dengan penghantar. Disipasi daya tergantung pada rugi-rugi daya I^2R di bagian pertemuan kontak dan di sepanjang penghantar. Arus yang tinggi juga dapat menyebabkan tegangan jatuh (*voltage drop*) pada bagian sambungan karena tahanan kontak yang besar. Akibatnya akan terjadi peningkatan temperatur. Temperatur maksimum yang diijinkan untuk penghantar rel busbar tembaga adalah 65°C [9]. Hubungan tegangan jatuh pada sambungan dengan temperatur yang terjadi dapat dituliskan dengan persamaan (6) [7]:

$$T_c^2 - T_0^2 = \frac{V_d^2}{4L} \quad (6)$$

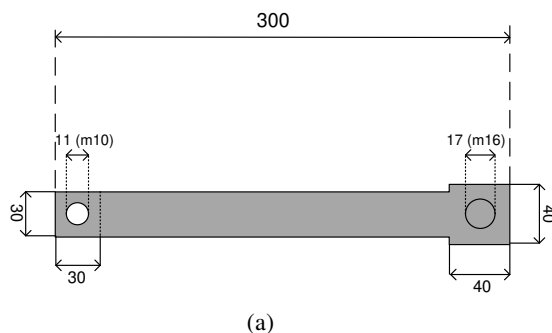
dimana:

- T_c : temperatur akhir kontak sambungan ($^\circ\text{C}$)
- T_0 : temperatur awal/ambient ($^\circ\text{C}$)
- V_d : tegangan jatuh sambungan (volt)
- L : konstanta Wiedemann-Franz Lorenz ($2,45 \times 10^{-8}$, V^2/K^2)

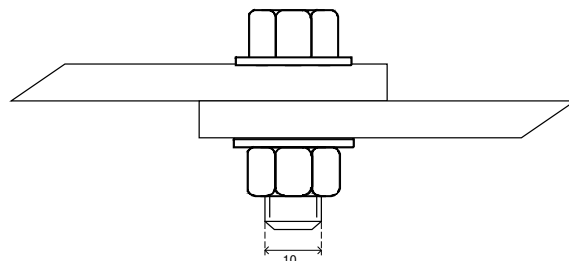
Temperatur kontak yang tinggi dapat berdampak pada proses degradasi sambungan listrik. Dengan demikian, kenaikan temperatur dalam kontak listrik untuk sistem tegangan tinggi menjadi salah satu parameter utama yang dipertimbangkan penggunaannya dalam aplikasi tertentu [10].

III. PENGUJIAN DAN EKSPERIMEN

Pengujian dilakukan menggunakan busbar tembaga (*copper busbar*) dengan kapasitas arus nominalnya adalah 350 A, sehingga ukuran busbar menurut standar SNI 04-0225-2000 (*Persyaratan Umum Instalasi Listrik*) memiliki luas penampang, tebal x lebar = $3 \times 30 \text{ mm} = 90 \text{ mm}^2$, dengan luas *area* kontakannya adalah $30 \times 30 \text{ mm}$. Baut yang digunakan untuk mengencangkan sambungan adalah baut *stainless steel* dengan ukuran M10. Gambar 5 menunjukkan langkah-langkah dalam pengujian tahanan kontak dan

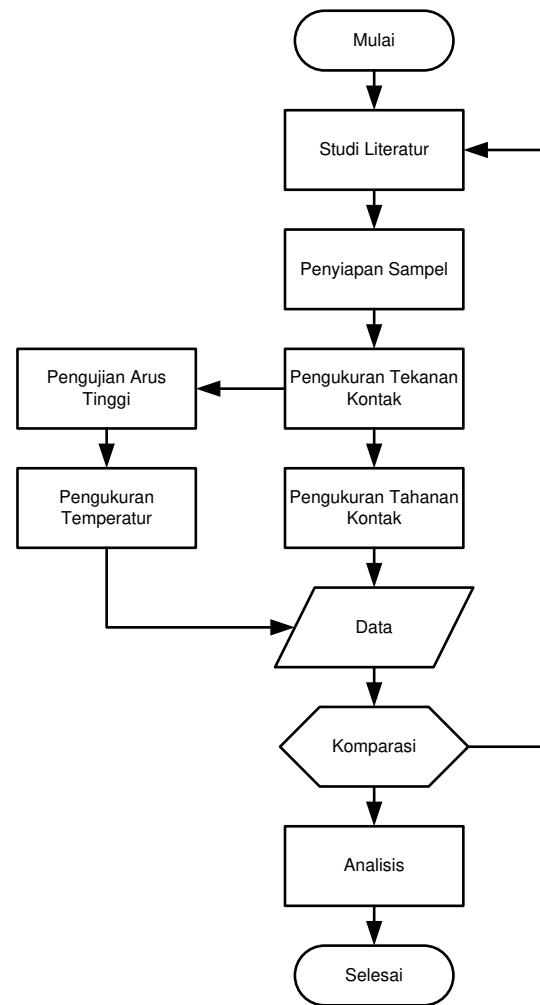


(a)



(b)

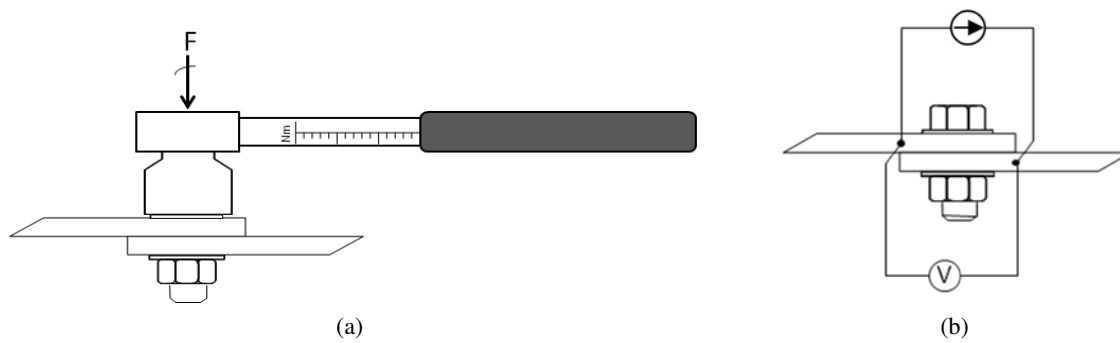
Gambar 6. Dimensi dan konfigurasi sampel sambungan busbar sesuai Shape 1 (Tabel 1). (a) tampak atas; (b) tampak samping.



Gambar 5. Langkah-langkah dalam pengujian tahanan kontak dan temperatur sambungan busbar.

temperatur sambungan busbar. Dimensi dan tipe sambungan busbar mengacu pada Tabel 1 dengan menggunakan *shape* 1 seperti pada Gambar 6.

Pengujian dilakukan dengan dua tahap. Tahap pertama dilakukan pengujian untuk mengetahui pengaruh penambahan tekanan kontak terhadap nilai tahanan kontak. Penambahan tekanan kontak dilakukan dengan menambah kekencangan baut kontak. Alat yang digunakan adalah torsi meter mekanik dengan tekanan antara 6 sampai dengan 36 MPa, seperti



Gambar 7. (a) Penambahan tekanan kontak; (b) pengujian tahanan kontak dengan metode 4 kawat.

ditunjukkan pada Gambar 7(a). Pengukuran tahanan kontak sambungan busbar dilakukan dengan metode 4 kawat seperti ditunjukkan pada Gambar 7(b) diatas.

Arus akan mengalir ke sambungan busbar dengan menggunakan sumber arus DC (I), melalui 2 kawat penghantar yang terhubung ke ujung sambungan. Besarnya arus yang dialirkan ke sambungan bervariasi antara 2 A, 4 A, dan 6 A. Kemudian pada titik yang sama digunakan 2 kawat lagi yang terhubung ke voltmeter untuk mengukur besarnya tegangan jatuh (ΔV_d) pada masing-masing arus yang terjadi di sambungan dan biasanya dalam orde mili volt. Selanjutnya untuk menentukan tahanan kontak (R_c) dilakukan dengan menggunakan persamaan (7) [11].

$$R_c = \frac{\Delta V_d}{I} \quad (7)$$

dimana:

- R_c : tahanan kontak (Ω)
- V_d : tegangan jatuh (Volt)
- I : arus (A)

Permasalahan yang timbul dalam pengukuran tahanan kontak antara dua logam adalah adanya efek termal EMF atau termoelektrik. Adanya termoelektrik ini dapat mempengaruhi tingkat akurasi pengukuran tahanan kontak. Besarnya termoelektrik tergantung pada besarnya arus pengujian dan lamanya pembebanan arus. Jadi dalam hal ini pengukuran tahanan kontak dengan menggunakan persamaan (7) merupakan pengukuran tahanan kontak yang masih ada pengaruh termoelektrik. Oleh karena itu untuk menghilangkan efek termoelektrik ini maka dilakukan pengukuran dengan membalikan polaritas arus pengujian. Pengukuran dilakukan dengan cara memberikan arus DC (I_f) ke sambungan busbar melalui 2 kawat ke ujung titik sambungan, dan ukur tegangan jatuh di titik tersebut dengan voltmeter (ΔV_f) yang terhubung dengan 2 kawat. Kemudian *sample* dialirkan arus DC (I_r) kembali namun polaritasnya diubah dan

ukur kembali tegangan jatuh di titik tersebut dengan voltmeter (V_r). Dan untuk menentukan tahanan kontak (R_c) dilakukan dengan menggunakan persamaan (8) [12].

$$R_c = \frac{|V_f| + |V_r|}{|I_f| + |I_r|} \quad (8)$$

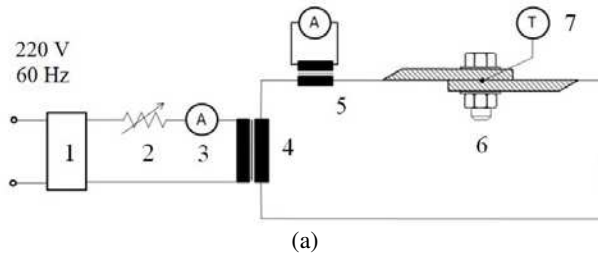
dimana:

- R_c : tahanan kontak (Ω)
- V_f : tegangan forward (Volt)
- V_r : tegangan reverse (Volt)
- I_f : arus forward (A)
- I_r : arus reverse (A)

Pengukuran dengan metode ini akan mendapatkan hasil yang lebih akurat karena dapat meminimalisir pengaruh termoelektrik atau emf. Beberapa standar internasional juga merekomendasikan metode ini seperti ASTM dan EIA. Hasil pengukuran tahanan kontak dengan menggunakan persamaan (7) dan persamaan (8) kemudian dibandingkan untuk mengetahui tingkat akurasi dari pengukuran.

Tahap kedua dilakukan pengujian sambungan busbar dengan pembebanan arus tinggi yaitu 350 A. Pengujian ini dilakukan untuk mengukur temperatur maksimum sambungan busbar pada tekanan kontak 12, 24, dan 36 MPa.

Gambar 8 merupakan rangkaian pengujian arus untuk mengetahui kenaikan temperatur sambungan busbar; (1) power supply, (2) potensiometer, (3) amperemeter, (4) trafo arus, (5) tang ampere, (6) sampel, (7) termometer. Mula-mula sumber arus AC dialirkan melalui power supply, agar beban arus AC yang dibutuhkan sesuai pengujian yaitu 350 A, maka arus diperbesar dengan trafo arus. Besarnya arus pengujian yang dialirkan pada sampel harus diatur dan dijaga konstan sebesar 350 A selama waktu pengujian yaitu sekitar 60 menit, dimana kenaikan temperatur dipantau dan dicatat pada setiap interval 5 menit sekali sampai mencapai *steady state*.



Gambar 8. Pengujian temperatur busbar (a) Rangkaian; (b) foto.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengukuran Tahanan Kontak Sambungan Busbar Tembaga

Pengukuran tahanan kontak sambungan busbar tembaga merupakan tahap pertama yang dilakukan dalam pengujian ini. Hal ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh tekanan terhadap tahanan apabila dilalui arus-arus yang relatif kecil.

Dari grafik pada Gambar 9 dan 10 dapat diperhatikan bahwa peningkatan tekanan kontak dari 6 – 30 MPa dapat menyebabkan nilai tahanan kontak berkurang dari 16 – 11 $\mu\Omega$ dengan penurunan rata-rata 0,2 $\mu\Omega$ /MPa. Peningkatan tekanan kontak dari 30 MPa ke atas, nilai tahanan kontak relatif tidak berubah yaitu dikisaran 11 $\mu\Omega$ yang merupakan tahanan maksimal terkecil yang dapat diusahakan. Gambar 9 merupakan hasil pengukuran tanpa menghilangkan efek termoelektrik yaitu dengan menggunakan persamaan (7).

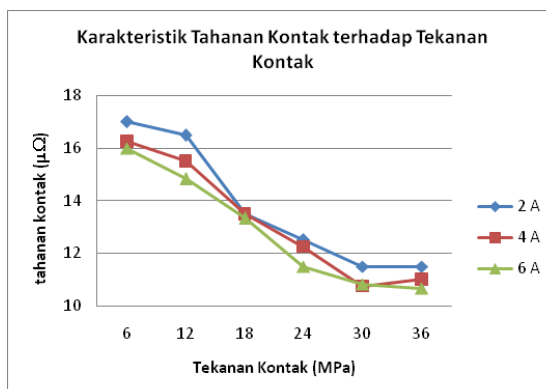
Hasil pengukuran tahanan kontak untuk *rating* arus yang berbeda tidak sama. Hal ini juga bisa dilihat dari bentuk kurva yang memiliki simpangan yang besar pada pengujian *rating* arus yang berbeda. Sedangkan Gambar 10 merupakan

hasil pengukuran dengan menghilangkan efek termoelektrik menggunakan persamaan (8). Hasil pengukuran tahanan kontak untuk *rating* arus yang berbeda tidak menunjukkan adanya simpangan yang lebih besar. Dengan demikian metode pengukuran ini lebih menghasilkan hasil pengukuran yang lebih akurat.

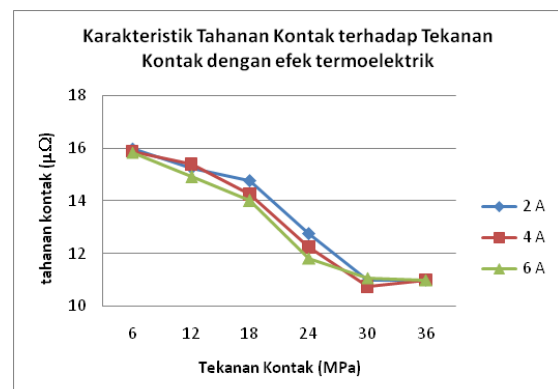
B. Hasil Pengukuran Temperatur Kontak

Hasil pengukuran temperatur kontak dari ketiga jenis sampel dengan variasi tekanan kontak 12, 24, dan 36 MPa. Besarnya pembebanan arus bolak-balik 350 A, dengan waktu pembebanan selama 60 menit. Hasil pengukurannya ditunjukkan pada Gambar 11.

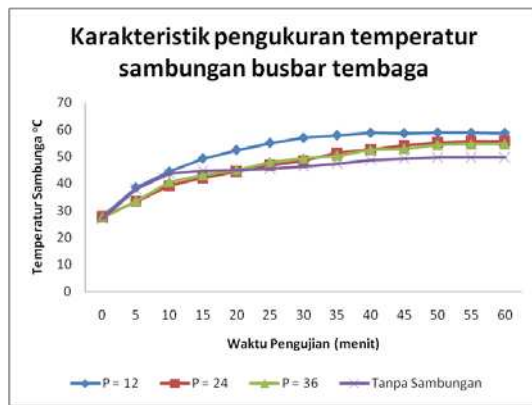
Pada Gambar 11 dapat diperhatikan bahwa pada tekanan kontak 12, 24, dan 36 MPa temperatur maksimum masing-masing adalah 58°C, 55°C, dan 54°C. Waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi temperatur *steady* rata-rata yaitu di kisaran 40-50 menit. Selisih temperatur maksimum terkecil dari sambungan busbar terhadap temperatur referensi (busbar tanpa sambungan) adalah 5°C. Maka dengan bertambahnya tekanan kontak pada sambungan sampai tingkat tertentu dapat menurunkan temperatur maksimum sambungan.



Gambar 9. Grafik karakteristik tahanan kontak tanpa memperhatikan efek termoelektrik.



Gambar 10. Grafik karakteristik tahanan kontak dengan memperhatikan efek termoelektrik.



Gambar 11. Grafik karakteristik temperatur sambungan busbar tembaga pada tekanan kontak 12, 24, 36 MPa dan busbar tanpa sambungan beban arus 350 A selama 60 menit.

V. KESIMPULAN

Dengan meningkatnya tekanan kontak pada sambungan busbar maka nilai tahanan kontakannya akan semakin kecil dan temperatur maksimum sambungannya akan menurun pula. Peningkatan tekanan kontak dari 6 sampai 30 MPa menurunkan nilai tekanan kontak dari $16\mu\Omega$ sampai $11\mu\Omega$. Peningkatan tekanan kontak pada tekanan lebih dari 30 MPa tidak menyebabkan kenaikan tahanan kontak secara signifikan. Temperatur terendah sambungan busbar adalah 54°C dan dicapai pada tekanan kontak 36 MPa.

Untuk mengukur atau menghitung tahanan kontak sambungan, pemberian arus kecil hendaknya dilakukan dengan menyertakan polaritas yang berbeda. Dalam hal ini efek termoelektrik yang dihasilkan dari arus forward I_f akan dinetralkan oleh arus reverse I_r . Dengan menghilangkan efek termoelektrik pengukuran tahanan kontak akan menghasilkan nilai yang relatif sama meskipun dengan pemberian arus yang berbeda-beda, sehingga hasil pengukuran akan lebih akurat.

REFERENSI

- [1] Braunovic, M., Konchits, V.V., Myshkin, N.K., "Electrical Contacts Fundamentals, Applications And Technology," CRC Press, Taylor and Francis Group, ISBN: 1-57444-727-0, 2006.
- [2] Bhattacharyya, S., Choudhury, A., Jariwala, H.R., Shetty, M.S., Rajulkumar, "Maintaining Low Resistance in Conductive Joints," *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 3, No. 6, December 2011.
- [3] Suwarno, "Material Elektroteknik," Institut Teknologi Bandung, Megatama, ISBN: 979-99701-1-3, 2006.
- [4] Popa, I., Cautil, I., Florica, D., Ocoleanu, F., "Modelling and Optimization of High Currents Dismountable Contacts," *International Conference On Electromechanical And Power Systems*, Chisinau, Rep. Moldova, 2007.
- [5] Bhattacharyya, S., Choudhury, A., Jariwala, H.R., Shetty, M.S., Rajulkumar, "Electrical Performance of Conductive Bolted Joints of Copper and Aluminum Busbars," *Int J Engg Techsci*, Vol. 2(4), 2011.
- [6] Farahat, M.A., "Factors Affecting The Life Time of The Electric Joints," *Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10)*, Cairo University, Egypt, December 19-21, 2010.
- [7] Braunovic, M., "Reliability of Power Connections," *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, ISSN 1009-3095, pp. 343-356, 2007.
- [8] Chen, H.L., Tseng, K.C., Yang, Y.S., "Effect of The Oxide Film Formed On The Electrical Properties of Cu-Zn Alloy Electric Contact Material," *The 4th International Conference on Technological Advances of Thin Film and Surface Coatings*, 2008.
- [9] Standar Nasional Indonesia, *Persyaratan Umum Instalasi Listrik*, SNI 04-0225-2000, Badan Standarisasi Nasional (BSN), Jakarta, 2002.
- [10] Medora, N.K., *Connection Technology*, Chapter 17, Electronic Failure Analysis Handbook, McGraw-Hill, 2004.
- [11] ANSI, *Test Method for DC Contact Resistance, Drop cable to F-Connectors and F81 Barrels*, ANSI/SCTE 103 2004, American National Standard, 2004.
- [12] ASTM, *Standard Test Methods for Measuring Resistance of Electrical Connections (Static Contacts)*, ASTM B539-02, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA, 2008.